

Розробка енергозберігаючої технології підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи

Є. Є. Чайковська

Розроблено інтегровану систему підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи на основі прогнозування зміни ємності акумуляторної батареї при вимірюванні напруги на вході в гібридний контролер заряду, напруги на виході із інвертора та частоти напруги. Прийняття випереджуваних рішень на підтримку ємності акумуляторної батареї щодо зміни потужності теплоелектроакумулятора базується на встановленні співвідношення напруги на вході в гібридний контролер заряду та напруги на виході із інвертора, що вимірюються. Забезпечено зміну числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса щодо зміни витрати та температури води, що нагрівається, зменшивши термін заряду до 30 %. Виконано комплексне математичне та логічне моделювання вітро-сонячної електричної системи, що базується на математичному обґрунтуванні архітектури технологічної системи та математичному обґрунтуванні підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи. Основою запропонованої технологічної системи є динамічна підсистема, що включає наступні складові: вітроенергетичну установку, фотоелектричний модуль, гібридний контролер заряду та інвертор, масив акумуляторних батарей, теплоелектроакумулятор. Визначено постійні часу та коефіцієнти математичних моделей динаміки щодо зміни ємності акумуляторної батареї, числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрати місцевої води. Здобуто функціональну оцінку зміни ємності акумуляторної батареї, числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрати місцевої води щодо зміни температури місцевої води в діапазоні 30–70 °С. Визначення підсумкової функціональної інформації щодо прогнозування зміни ємності акумуляторної батареї надає можливість приймати наступні випереджувачі рішення: на зміну числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, зміну витрати місцевої води. Підтримка ємності акумуляторної батареї відбувається на основі узгодження виробництва та споживання енергії

Ключові слова: вітро-сонячна електрична система, акумуляторна батарея, теплоелектроакумулятор, гібридний контролер заряду, інвертор

1. Вступ

В умовах економії природного палива та зниження шкідливих викидів в атмосферу підтримка функціонування вітро-сонячних електричних систем потребує удосконалення щодо акумуляування електричної енергії. Так, наприклад, на основі математичного та логічного моделювання у складі технологічної системи функці-

онування акумуляторної батареї розроблена технологія підтримки зміни ємності батареї, що базується на прогнозуванні зміни напруги при вимірюванні температури електроліту в об'єму акумуляторів. Використання інтегрованої системи оцінки зміни напруги, здобутої на основі узгодження електрохімічного та дифузійного процесів розряду та заряду, надає можливість приймати своєчасні рішення на підзаряд щодо недопущення перезаряду та недопустимого розряду [1].

У зв'язку із поєднанням двох різнорідних джерел енергії в єдину вітро-сонячну електричну систему, що обумовлено необхідністю розширення терміну споживання електричної енергії, розроблено спеціальні гібридні контролери для управління зарядом акумуляторних батарей. PWM контролери функціонують за методом широтно-імпульсної модуляції струму заряду. MPPT контролери, що функціонують за принципом пошуку максимальної потужності генерації енергії, узгоджують зміну напруги із зміною струму. Відомі методи заряду MPPT контролерів базуються на скануванні щодо встановлення точки максимальної потужності. Так, згідно методу Perturb and Observe контролер виконує повне сканування вольт-амперної характеристики, знаходячи точку максимальної потужності в заданий термін часу. До наступного повного сканування контролер обчислює зміну потужності і зрушує робочу точку на нову напругу, якщо при ній потужність більше. Удосконалення методу щодо оптимального встановлення максимальної потужності виконують на рівні оцінки зміни періодичності повного сканування, глибини та частоти ітерацій, т. і. Згідно методу Scan and Hold після виконання первинного сканування встановлена точка максимальної потужності не змінюється до наступного повного сканування. Метод Percentage of open circuit voltage дозволяє використовувати робочу напругу на основі оцінки напруги холостого ходу. Вибір робочої точки без сканування підтримує також метод оцінки максимальної потужності генерації енергії в узгодженні із максимальною потужністю акумуляторної батареї. В умовах непостійної сонячної радіації та зміни швидкості вітру здобуття сумарної максимальної потужності двох джерел енергії не співпадає за часом, як впродовж доби, так і року. В складних умовах виробництва електричної енергії при зміні споживання актуальним завданням щодо подальшого розвитку технологій вітро-сонячних електричних систем є підтримка ємності акумуляторної батареї щодо узгодження виробництва та споживання енергії в умовах енергозбереження. З цією ціллю необхідно прогнозувати зміну ємності акумуляторної батареї при вимірюванні напруги на вході в гібридний контролер заряду та напруги на виході із інвертора щодо оцінки їх співвідношення при вимірюванні частоти напруги. Прийняття випереджуючих рішень на зміну потужності теплоелектроакумулятора дозволяє, підтримуючи ємність акумуляторної батареї, виконати зміну числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса щодо зміни витрати місцевої води та рівня підігріву.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Відомі методи оптимізації вітро-сонячних електричних систем базуються на удосконаленні інтелектуальних систем управління на основі гібридних контролерів заряду, підкреслюючи актуальність поєднання двох різнорідних джерел енергії. Одним із напрямків оптимізації вітро-сонячних електричних систем є удосконалення функції МРРТ контролерів щодо пошуку максимальної потужності. Так, наприклад, в роботі [2] запропоновано алгоритм МРРТ гібридних контролерів, заснований на інтеграції між управлінням дробового порядку та методом інкрементної провідності щодо підвищення точності стеження. В роботі [3] встановлена можливість здобуття максимальної потужності у різний період часу як продовж доби, та і року, а в роботі [4] підкреслено максимальну ефективність МРРТ гібридних контролерів щодо відслідковування максимальної потужності з ефективністю до 99,60 %, В роботі [5] на основі запропонованої технологічної схеми встановлено підвищення ефективності вітро-сонячної електричної системи у порівнянні з індивідуальним використанням вітрової та сонячної енергії саме з використанням функції МРРТ гібридних контролерів. В роботі [6] з ціллю удосконалення функції МРРТ гібридних контролерів запропоновано спеціальний алгоритм, що розроблений на основі моделювання підсистем вітрової та сонячної енергії, акумуляторної батареї та інвертора на основі Matlab Simulink. В роботі [7] запропоновано використання методу постійної напруги щодо максимальної передачі потужності на основі функціонування МРРТ гібридних контролерів. Зроблено висновок про необхідність визначання ключових особливостей щодо використання методу. Але, підкреслюючи актуальність поєднання двох різнорідних джерел енергії та спроможність МРРТ гібридних контролерів щодо пошуку максимальної потужності, автори [3–5, 7] не розглядають необхідність підтримки ємності акумуляторної батареї щодо узгодження виробництва та споживання енергії у складі вітро-сонячної електричної системи. Розроблені алгоритми [2, 6] щодо удосконалення функції МРРТ гібридних контролерів, що підтвердили спроможність здобуття максимальної потужності від кожного із джерел енергії, не враховують споживання електричної енергії щодо узгодження із виробництвом. Удосконаленню інтелектуальних систем управління присвячена робота [8], в якій представлено гібридний контролер з нечіткою логікою щодо управління виробництвом та передачею енергії. Описані командні сигнали, а також виділено співвідношення інтеграції системи відновлюваної енергії. Але у запропонованій технології не представлено управління узгодженням виробництва електричної енергії із споживанням, тому надлишок енергії направлено в систему електролізу для отримання водню. Більш того, представлена технологія потребує підключення до мережі щодо забезпечення піку споживання. В роботі [9] запропоновано нейронну модель прогнозування зміни параметрів вітро-сонячної електричної системи як нелінійної динамічної системи. Оптимізація інтелектуального управління базується на представленні підсистем генерації енергії вітру, сонця, акумуляторну батарею та навантаження. На основі комп'ютерного моделювання встановлена продуктивність інтелектуального уп-

равління розподіленою моделлю, але без оцінки зміни ємності акумуляторної батареї щодо узгодження виробництва та споживання енергії. В роботі [10] представлена оптимізація вітро-сонячної електричної системи на основі управління функціонуванням інвертора. Введено додатковий блок диспетчерського управління для відстеження максимальної потужності джерел енергії. Використано спеціальні методи щодо одночасного збору енергії при різних кліматичних умовах. Для фотоелектричної системи – алгоритм Perturb&Observe, для вітрогенератора – Hill Climb Search. Підтримка споживання виробленої енергії на основі встановлення постійної напруги та частоти напруги не оцінює зміну ємності акумуляторної батареї. В роботі [11] запропоновано економічну модель оптимізації вітро-сонячної електричної системи на основі мінімізації експлуатаційних витрат. Використано методи метаевристичної оптимізації щодо порівняння генетичного алгоритму та алгоритму оптимізації рою частинок. Оптимізація враховує витрати на виробництво сонячної та вітрової енергії, відновлення теплової енергії від паливного елемента, поставку енергії, обмін електроенергії з мережею та технічне обслуговування. Встановлена економічна доцільність структури гібридної комбінованої вітро-сонячної електричної системи з підключенням до мережі та тепловим елементом, але на статичному рівні. Встановлено переваги використання генетичного алгоритму щодо здобуття результатів оптимізації, але без прогнозування зміни параметрів складових системи.

Виходячи із аналізу літературних джерел [2–11] встановлено, що гібридний контролер заряду у складі вітро-сонячної електричної системи підтримує заряд акумуляторної батареї, використовуючи теплоелектроакумулятор у якості не регульованого баласту. Скидання зайвої енергії на баласт при використанні MPPT функції контролера приводить до не компенсованих втрат електричної енергії, що не дозволяє забезпечити відповідний рівень потужності заряду акумуляторної батареї. Більш того, використання теплоелектроакумулятора у якості баласта виключає потребу підтримки функціонування вітроенергетичної установки саме з використанням акумуляування теплоти щодо регулювання потужності вітрогенератора. Не врахування цієї якості теплоелектроакумулятора може привести до розгону вітрогенератора при значній швидкості вітру та виходу його із строю. Саме теплоелектроакумулятор стає головним центром узгодження зміни сумарної потужності вітро-сонячної електричної системи та споживання енергії, виконуючи перерозподіл акумуляованої теплової та електричної енергії щодо споживання. Тому запропоновано вимірювання сумарної напруги на вході в гібридний контролер заряду та напруги на виході із інвертора щодо оцінки співвідношення виробництва електричної енергії та споживання при вимірюванні частоти напруги. Відомо, що управління теплоелектроакумулятором виконують за принципом термостата, тобто при встановленні необхідної температури місцевої води, що нагрівається, відбувається відключення теплоелектроакумулятора від живлення. Не використання зміни витрати місцевої води впродовж терміну заряду теплоелектроакумулятора підвищує термін заряду та приводить до значних витрат на споживання електричної енергії. Тому не виріше-

ною проблемною частиною щодо підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи є прогнозування зміни ємності акумуляторної батареї. З метою енергозбереження необхідно вимірювати напругу на вході в гібридний контролер заряду та напругу на виході із інвертора щодо оцінки їх співвідношення при вимірюванні частоти напруги. Прийняття випереджуючих рішень на зміну потужності теплоелектроакумулятора дозволяє, підтримуючи ємність акумуляторної батареї, виконати зміну числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса. Зміна витрати місцевої води, що подається в теплоелектроакумулятор, забезпечує встановлений рівень зміни температури місцевої води, що нагрівається. Цим обґрунтовується необхідність проведення досліджень в даному напрямку.

3. Мета та задачі дослідження

Мета роботи – розробити енергозберігаючу технологію підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи у складі технологічної системи.

Поставлена мета буде досягнута при виконанні таких задач:

- обґрунтувати необхідність прогнозування зміни ємності акумуляторної батареї щодо прийняття випереджуючих рішень на зміну потужності теплоелектроакумулятора на основі зміни числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрати місцевої води, що нагрівається;

- запропонувати використання оцінки зміни співвідношення сумарної напруги вітрогенератора, фотоелектричного модуля на вході в гібридний контролер заряду, напруги на виході із інвертора, що вимірюються, при вимірюванні частоти напруги;

- розробити структурні схеми та виконати комплексне математичне та логічне моделювання щодо здобуття еталонної та функціональної оцінки зміни ємності акумуляторної батареї, числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрати місцевої води;

- розробити структурну схему та виконати логічне моделювання щодо здобуття інтегрованої системи підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи на рівні прийняття рішень.

4. Матеріали та методи дослідження щодо підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи

4. 1. Математичне обґрунтування архітектури технологічної системи

На основі методологічного та математичного обґрунтування архітектури технологічних систем [1, 12–14] запропоновано архітектуру та математичне обґрунтування архітектури технологічної системи функціонування вітро-сонячної електричної системи. Її основою є інтегрована динамічна підсистема, що має у своєму складі наступні складові: вітроенергетичну установку, фотоелектричний модуль, гібридний контролер заряду та інвертор, масив акумуляторних батарей, теплоелектроакумулятор (рис. 1). Іншими блоками, що входять до складу технологічної си-

стеми, є блоки заряду, розряду та блок оцінки функціональної ефективності, що знаходяться в узгодженій взаємодії із динамічною підсистемою (рис. 1).

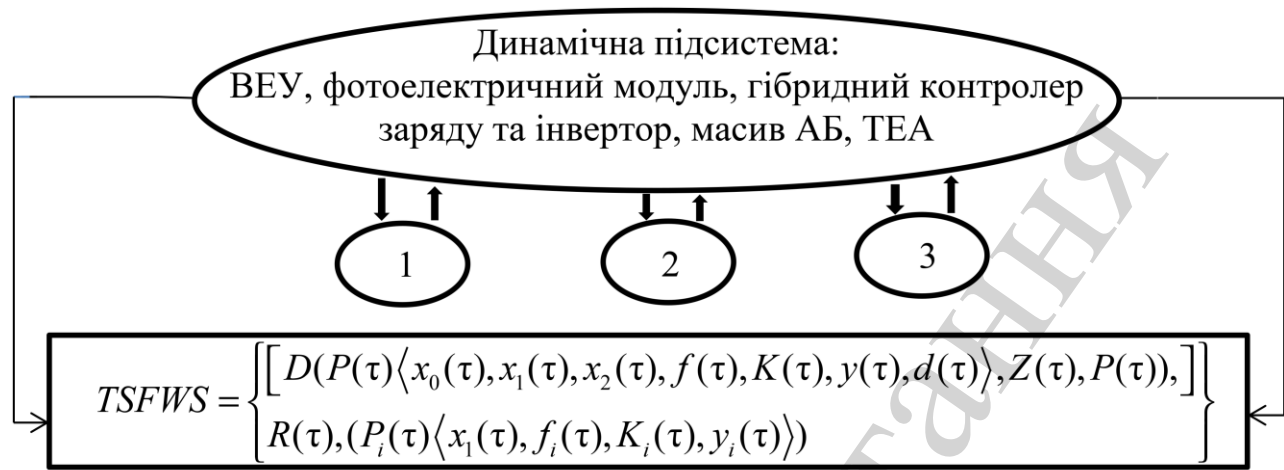


Рис. 1. Архітектура та математичне обґрунтування архітектури технологічної системи: 1 – блок заряду; 2 – блок розряду; 3 – блок оцінки функціональної ефективності, де ВЕУ – вітроенергетична установка; АБ – акумуляторна батарея; ТЕА – теплоелектроакумулятор,

На рис. 1 *TSFWS* – технологічна система функціонування вітро-сонячної електричної системи; *D* – динамічна підсистема (вітроенергетична установка, фотоелектричний модуль, гібридний контролер заряду та інвертор, масив акумуляторних батарей, теплоелектроакумулятор); *P* – властивості елементів технологічної системи; τ – час, с; x – впливи (зміна сонячної радіації, зміна швидкості вітру, зміна споживання електричної енергії, т. і.); f – параметри, що вимірюються (напруга на вході в гібридний контролер заряду, напруга на виході із інвертора, частота напруги); f_i – параметр, що діагностується (потужність теплоелектроакумулятора); K – коефіцієнти математичного опису динаміки зміни ємності акумуляторної батареї, числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, зміни витрати місцевої води; K_i – коефіцієнти математичного опису функціональної ефективності технологічної системи; y – вихідні параметри (зміна ємності акумуляторної батареї, числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрати місцевої води); y_i – оцінка функціональної ефективності вітро-сонячної електричної системи); d – динамічні параметри зміни ємності акумуляторної батареї; числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрати місцевої води; Z – логічні відносини в *D* щодо здобуття підсумкової інформації для прийняття рішень на підтримку ємності акумуляторної батареї; R – логічні відносини в *TSFWS* щодо підтвердження правильності прийнятих рішень від блоків у складі технологічної системи. Індеси: i –

число елементів технологічної системи; 0, 1, 2 – початковий стаціонарний режим, зовнішній, внутрішній характер впливів.

Запропоновано математичне обґрунтування підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи на основі прогнозування зміни ємності акумуляторної батареї при вимірюванні наступних параметрів: напруги на вході в гібридний контролер заряду, напруги на виході із інвертора та частоти напруги. Математичний опис (1) базується на математичному обґрунтуванні архітектури технологічних систем, методології математичного опису динаміки енергетичних систем, методі графа причинно-наслідкових зв'язків [1, 12–14].

$$SFWS(\tau) = \left\{ \begin{array}{l} (IDS(\tau)(PIDS(\tau)\langle sd(\tau), lp(\tau), lf(\tau), fd(\tau) \rangle, \\ MMIDS(\tau, z), CIDS(\tau), LCIDS(\tau) \\ \langle x_0(\tau), x_1(\tau), x_2(\tau), f(\tau), K(\tau), y(\tau, z), d(\tau), FIIDS(\tau) \rangle, \\ LMDIDS(\tau), MDIDS(\tau), NCF(\tau), SIDS(\tau), LSIDS(\tau) \\ \langle f(\tau), K(\tau), y(\tau, z), d(\tau), FIIDS(\tau) \rangle \\ PIDS(\tau)), R(\tau), (PB_i(\tau)\langle x_1(\tau), f_i(\tau), K_i(\tau), y_i(\tau) \rangle)CNCF(\tau)), \end{array} \right\}, \quad (1)$$

де $SFWS(\tau)$ – підтримка функціонування вітро-сонячної електричної системи;

$IDS(\tau)$ – інтегрована динамічна підсистема (вітроенергетична установка, фотоелектричний модуль, гібридний контролер заряду та інвертор, масив акумуляторних батарей, теплоелектроакумулятор);

$PIDS(\tau)$, $PB(\tau)$ – властивості елементів інтегрованої динамічної підсистеми, блоків технологічної системи, відповідно;

$sd(\tau)$ – вихідні дані (потужність вітроенергетичної установки; потужність фотоелектричного модуля; тип гібридного контролера заряду та інвертора, ємність акумуляторної батареї; потужність та об'єм теплоелектроакумулятора);

$lp(\tau)$ – гранична зміна параметрів (напруги на вході в гібридний контролер заряду, потужності теплоелектроакумулятора);

$lf(\tau)$ – рівні функціонування згідно зміні напруги на вході в гібридний контролер заряду та на виході із інвертора;

fd – здобуті параметри (параметри теплообміну в теплоелектроакумуляторі, число обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрата води, що нагрівається, термін заряду теплоелектроакумулятора для встановлених рівнів функціонування);

$MMIDS(\tau, z)$ – математичне моделювання динаміки зміни ємності акумуляторної батареї, зміни числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрати місцевої води;

$MIIDS(\tau)$ – гранично припустима зміна сумарної потужності вітро-сонячної електричної системи, потужності теплоелектроакумулятора, числа обертів елект-

родвигуна циркуляційного насосу, витрати місцевої води, температури місцевої води;

$CIDS(\tau)$, $MDIDS(\tau)$, $SIDS(\tau)$ – контроль працездатності, прийняття рішень, ідентифікація стану в динамічній підсистемі, відповідно;

$LCIDS(\tau)$, $LMDIDS(\tau)$, $LSIDS(\tau)$ – логічні відносини в $CIDS(\tau)$, $MDIDS(\tau)$, $SIDS(\tau)$, відповідно;

$FIIDS(\tau)$ – функціональна підсумкова інформація щодо прийняття рішень в динамічній підсистемі;

$NCF(\tau)$, $CNCF(\tau)$ – нові умови функціонування, підтвердження нових умов функціонування від блоків технологічної системи;

$R(\tau)$ – логічні відносини між динамічною підсистемою та блоками розряду, заряду, функціональної оцінки ефективності, що входять до складу технологічної системи функціонування вітро-сонячної електричної системи;

$x(\tau)$ – впливи;

$f(\tau)$ – параметри, що діагностуються;

$K(\tau)$ – коефіцієнти математичного опису;

$y(\tau, z)$ – вихідні параметри;

$d(\tau)$ – динамічні параметри;

z – координата довжини, м;

τ – час, с. Індеси: i – число елементів $SFWS(\tau)$; 0, 1, 2 – початковий режим, зовнішній, внутрішній характер впливів.

Математичний опис (1) та математичне обґрунтування архітектури технологічної системи (рис. 1) дозволяють підтримувати функціонування вітро-сонячної електричної системи з використанням наступних дій:

- контролю працездатності ($CIDS(\tau)$) динамічної підсистеми на основі математичного ($MMIDS(\tau, z)$) та логічного ($LCIDS(\tau)$) моделювання щодо здобуття еталонної ($MIIDS(\tau)$) оцінки зміни ємності акумуляторної батареї, числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрати місцевої води;

- контролю працездатності ($CIDS(\tau)$) динамічної підсистеми на основі математичного ($MMIDS(\tau, z)$) та логічного ($LCIDS(\tau)$) моделювання щодо здобуття функціональної ($FIIDS(\tau)$) оцінки зміни ємності акумуляторної батареї, числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрати місцевої води;

- прийняття рішень ($MDIDS(\tau)$) з використанням функціональної інформації ($FIIDS(\tau)$), здобутої на основі логічного моделювання ($LMDIDS(\tau)$);

- прийняття рішень на зміну частоти напруги з використанням функціональної оцінки зміни ємності акумуляторної батареї, числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрати місцевої води, ($FIIDS(\tau)$);

- ідентифікації ($SIDS(\tau)$) нових умов функціонування вітро-сонячної електричної системи ($NCF(\tau)$) на основі логічного моделювання ($LSIDS(\tau)$) у складі динамічної підсистеми та підтвердження нових умов функціонування на основі логічного моделювання ($R(\tau)$) від блоків технологічної системи.

4. 3. Математичне моделювання динаміки зміни ємності акумуляторної батареї

Згідно формули (1) та математичному обґрунтуванню архітектури технологічної системи (рис. 1), запропоновано прогнозування зміни ємності акумуляторної батареї при вимірюванні напруги на вході в гібридний контролер заряду, при вимірюванні напруги на виході із інвертора та частоти напруги. Передатна функція за каналом: «ємність акумуляторної батареї – потужність теплоелектроакумулятора» здобута в результаті рішення системи нелінійних диференціальних рівнянь. Зміна ємності акумуляторної батареї при використанні оцінки зміни температури місцевої води як у часі, так і вздовж координати довжини нагрівача теплоелектроакумулятора, представлена так:

$$W_{ec-N_{T_1}} = \frac{K_{ec} K_B (1 - L_B^*)}{(T_B S + 1) \beta - 1} (1 - e^{-\gamma \xi}), \quad (2)$$

де

$$K_{ec} = \frac{IU_1}{(U_1 - U_2)};$$

$$K_B = \frac{m(\theta_0 - t_0)}{G_{e0}};$$

$$L_B^* = \frac{1}{L_B + 1}; \quad L_B = \frac{G_B C_B}{\alpha_{B0} h_{B0}}; \quad \varepsilon^* = (1 - L_B^*);$$

$$\gamma = \frac{(T_B S + 1) \beta - 1}{\beta}; \quad \xi = \frac{z}{L_B}; \quad T_B = \frac{g_B C_B}{\alpha_{B0} h_{B0}};$$

$$\beta = T_M S + \varepsilon^* + 1; \quad T_M = \frac{g_M C_M}{\alpha_{B0} h_{B0}},$$

де EC – ємність акумуляторної батареї, А·годин; N – потужність теплоелектроакумулятора, кВт; I – струм, А; U_1 , U_2 – напруга на вході в гібридний контролер заряду та на виході із інвертора, відповідно, В; C – питома теплоємність, кДж/(кг·К); α – коефіцієнт тепловіддачі, кВт/(м²·К); G – витрата речовини, кг/с; g – питома маса речовини, кг/м; h – питома поверхня, м²/м; t , θ – температура місцевої води, розподіляючої стінки, відповідно, К; z – координата довжини нагрівача, м; T_e , T_m – постійні часу, що характеризують теплову акумулюючу здатність місцевої води, металу, с; m

– показник залежності коефіцієнта тепловіддачі від витрати; τ – час, с; S – параметр перетворення Лапласа; $S=j\omega$; ω – частота, 1/с. Індекси: 0 – вихідний стаціонарний режим; 1 – вхід в електричну систему; v – місцева вода; m – металева стінка.

Передатна функція за каналом: «ємність акумуляторної батареї – потужність теплоелектроакумулятора» здобута на основі вирішення системи нелінійних диференціальних рівнянь з використанням засобу перетворення Лапласа. Система диференціальних рівнянь включає рівняння стану як оцінку фізичної моделі електричної системи. До складу системи диференціальних рівнянь входять також рівняння енергії передаючого та сприймаючого середовищ – нагрівача теплоелектроакумулятора та місцевої води, відповідно та рівняння теплового балансу для стінки теплоелектронагрівача.

Рівняння енергії сприймаючого середовища розроблено із представленням зміни температури місцевої води як у часі, так і вздовж просторової координати, що співпадає з напрямом потоку руху середовища та включає коефіцієнт K_g . Рівняння енергії передаючого середовища включає коефіцієнт K_{ec} , що оцінює зміну ємності акумуляторної батареї щодо оцінки співвідношення виробництва та споживання енергії.

4. 4. Математичне моделювання динаміки зміни числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса

Згідно формули (1) та математичному обґрунтуванню архітектури технологічної системи (рис. 1), запропоновано оцінку зміни числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса теплоелектроакумулятора при вимірюванні частоти напруги. Передатна функція за каналом: «число обертів електродвигуна циркуляційного насоса – частота напруги» має такий вид:

$$W_{n-f_1} = \frac{K_f \chi_t S}{\gamma} (1 - e^{-\gamma_1 \xi}), \quad (3)$$

$$K_f = \frac{120 f (1-s)}{p_n}; \quad \chi_t = -f_s \frac{\partial p}{\partial t}; \quad \gamma = \frac{(T_b S + 1)\beta - 1}{L_b \beta};$$

$$T_b = \frac{g_b C_b}{\alpha_{b0} h_{b0}}; \quad L_b = \frac{G_b C_b}{\alpha_{b0} h_{b0}};$$

$$\beta = T_m S + \varepsilon^* + 1; \quad T_m = \frac{g_m C_m}{\alpha_{m0} h_{m0}};$$

$$\varepsilon^* = (1 - L_3^*); L_B^* = \frac{1}{L_B + 1};$$

$$\gamma_1 = \frac{(T_B S + 1)\beta - 1}{\beta}; \xi = \frac{z}{L_B},$$

де n – число обертів електродвигуна циркуляційного насоса, об/хв.; f – частота напруги, Гц; p_n – число пар полюсів електродвигуна циркуляційного насоса; α – коефіцієнт тепловіддачі, кВт/(м²·К); t – температура місцевої води, К; ρ – щільність місцевої води, кг/м³; f_s – перетин для проходу місцевої води, м²; C – питома теплоємність, кДж/(кг·К); G – витрата речовини, кг/с; ρ – щільність місцевої води, кг/м³; g – питома маса речовини, кг/м; h – питома поверхня, м²/м; z – координата довжини нагрівача, м; T_{θ} , T_m – постійні часу, що характеризують теплову акумулюючу здатність місцевої води, металу, с; S – параметр перетворення Лапласа; $S = \omega j$; ω – частота, 1/с.

Індекси: 0 – вихідний стаціонарний режим; 1 – вхід в електричну систему; θ – місцева вода; m – металева стінка.

4. 4. Математичне моделювання динаміки зміни витрати місцевої води

Згідно формули (1) та математичному обґрунтуванню архітектури технологічної системи (рис. 1), запропоновано оцінку зміни витрати місцевої води при зміні числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса. З цією ціллю система диференціальних рівнянь, що включає рівняння енергії місцевої води та рівняння теплового балансу для стінки нагрівача доповнена рівнянням сплошності місцевої води. Результатом вирішення системи диференціальних рівнянь з використанням перетворення Лапласа є передатна функція за каналом: «витрата місцевої води – число обертів електродвигуна циркуляційного насоса», що оцінює зміну витрати води при зміні потужності теплоелектроакумулятора:

$$W_{G_B - n_1} = \frac{\chi_t S}{\gamma} (1 - e^{-\gamma_1 \xi}), \quad (4)$$

де

$$\chi_t = -f_s \frac{\partial \rho}{\partial t}; \gamma = \frac{(T_B S + 1)\beta - 1}{L_B \beta};$$

$$T_B = \frac{g_B C_B}{\alpha_{B0} h_{B0}}; L_B = \frac{G_B C_B}{\alpha_{B0} h_{B0}};$$

$$\beta = T_M S + \varepsilon^* + 1; \quad T_M = \frac{g_M C_M}{\alpha_{B0} h_{B0}};$$

$$\varepsilon^* = (1 - L_B^*); \quad L_B^* = \frac{1}{L_B + 1};$$

$$\gamma_1 = \frac{(T_B S + 1)\beta - 1}{\beta}; \quad L_B^* = \frac{1}{L_B + 1}; \quad \xi = \frac{z}{L_B},$$

де n – число обертів електродвигуна циркуляційного насоса, об/хв.; α – коефіцієнт тепловіддачі, кВт/(м²·К); t – температура місцевої води, К; f_s – перетин для проходу місцевої води, м²; C – питома теплоємність, кДж/(кг·К); G – витрата речовини, кг/с; ρ – щільність речовини, кг/м³; g – питома маса речовини, кг/м; h – питома поверхня, м²/м; z – просторова координата довжини нагрівача, м; T_v , T_M – постійні часу, що характеризують теплову акумулюючу здатність місцевої води, металу, с; S – параметр перетворення Лапласа; $S = \omega j$; ω – частота, 1/с. Індокси: 0 – вихідний стаціонарний режим; 1 – вхід в електричну систему; v – місцева вода; m – металева стінка.

Виділено дійсну частину передатної функції (2) щодо оцінки зміни ємності акумуляторної батареї:

$$O_1(\omega) = \frac{(L_1 A_1) + (M_1 B_1) K_B K_{ec} (1 - L_B^*)}{(A_1^2 + B_1^2)}. \quad (5)$$

До складу коефіцієнта K_B входить температура поділяючої стінки θ :

$$\theta = (\alpha_v (t_1 + t_2) / 2) + A (t_1 + t_2) / 2 / (\alpha_v + A), \quad (6)$$

де t_1 , t_2 – температура місцевої води на вході та на виході з теплоелектроакумулятора, К, відповідно; α – коефіцієнт тепловіддачі, кВт/(м²·К). ; Індокси v – місцева вода.

$$A = 1 / (\delta_m / \lambda_m + 1 / \alpha_v), \quad (7)$$

де δ – товщина стінки нагрівача, м; λ – теплопровідність металу стінки нагрівача, кВт/(м·К); Індокси: v – місцева вода; m – металева стінка нагрівача.

Для використання дійсної частини $O_1(\omega)$ здобуто наступні коефіцієнти:

$$A_1 = \varepsilon^* - T_B T_M \omega^2; \quad A_2 = \varepsilon^* + 1; \quad (8)$$

$$B_1 = T_{\epsilon}^* \omega + T_{\epsilon} \omega + T_M \omega; \quad (9)$$

$$B_2 = T_M \omega; \quad C_1 = \frac{A_1 A_2 + B_1 B_2}{A_2^2 + B_2^2}; \quad D_1 = \frac{A_2 B_1 - A_1 B_2}{A_2^2 + B_2^2}; \quad (10)$$

$$L_1 = 1 - e^{-\zeta C_1} \cos(-\xi D_1); \quad M_1 = -e^{-\zeta C_1} \sin(-\xi D_1). \quad (11)$$

Виділено дійсну частину передатної функції (3) щодо оцінки зміни числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса:

$$O_2(\omega) = K_f \chi_t L_b (C_1 L_1) - (D_1 M_1). \quad (12)$$

Для використання дійсної частини $O_2(\omega)$ здобуто наступні коефіцієнти:

$$A_1 = -T_M \omega^2; \quad A_2 = \epsilon^* - T_b T_M \omega^2; \quad B_1 = (\epsilon^* + 1) \omega; \quad (13)$$

$$B_2 = T_b \epsilon^* \omega + T_b \omega + T_M \omega + \epsilon^*, \quad (14)$$

$$C_1 = \frac{A_1 A_2 + B_1 B_2}{A_2^2 + B_2^2}; \quad D_1 = \frac{A_2 B_1 - A_1 B_2}{A_2^2 + B_2^2}; \quad (15)$$

$$L_1 = 1 - e^{-\zeta C_1} \cos(-\xi D_1); \quad M_1 = -e^{-\zeta C_1} \sin(-\xi D_1). \quad (16)$$

Виділено дійсну частину передатної функції (4) щодо оцінки зміни витрати місцевої води:

$$O_3(\omega) = \chi_t L_b (C_1 L_1) - (D_1 M_1). \quad (17)$$

Для використання дійсної частини $O_3(\omega)$ здобуто наступні коефіцієнти:

$$A_1 = -T_M \omega^2; \quad A_2 = \epsilon^* - T_b T_M \omega^2; \quad B_1 = (\epsilon^* + 1) \omega; \quad (18)$$

$$B_2 = T_b \epsilon^* \omega + T_b \omega + T_M \omega + \epsilon^*, \quad (19)$$

$$C_1 = \frac{A_1 A_2 + B_1 B_2}{A_2^2 + B_2^2}; \quad D_1 = \frac{A_2 B_1 - A_1 B_2}{A_2^2 + B_2^2}; \quad (20)$$

$$L_1 = 1 - e^{-\zeta C_1} \cos(-\xi D_1); \quad M_1 = -e^{-\zeta C_1} \sin(-\xi D_1). \quad (21)$$

Реалізація передатних функцій (2)–(4), що здобуті на основі використання операторного методу вирішення системи нелінійних диференціальних рівнянь, утримують параметр перетворення Лапласа $-S(S=j\omega)$, де ω – частота, 1/с. Для переходу від частотної області до області часу виділено дійсні частини (5), (12), (17), що здобуті в результаті математичної обробки передатних функцій. Саме ці частини входять до складу інтегралів (22)–(24), що надають можливість здобути динамічні характеристики зміни ємності акумуляторної батареї, числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрати місцевої води, відповідно, з використанням зворотного перетворення Фур'є.

$$CE(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} O_1(\omega) \sin(\tau\omega/\omega) d\omega. \quad (22)$$

$$n(\tau) = G_b(\tau, z) K_f(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} O_2(\omega) \sin(\tau\omega/\omega) d\omega. \quad (23)$$

$$G_b(\tau, z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} O_3(\omega) \sin(\tau\omega/\omega) d\omega, \quad (24)$$

де CE – ємність акумуляторної батареї, А·годин; n – число обертів електродвигуна циркуляційного насоса; об/хв. G_b – витрата місцевої води, кг/с.

5. Результати досліджень технології підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи

5.1. Еталонна оцінка зміни ємності акумуляторної батареї, числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрати місцевої води, що нагрівається

Згідно формулам (1)–(4), виконано комплексне математичне моделювання вітро-сонячної електричної системи з використанням розробленої структурної схеми (рис. 2).

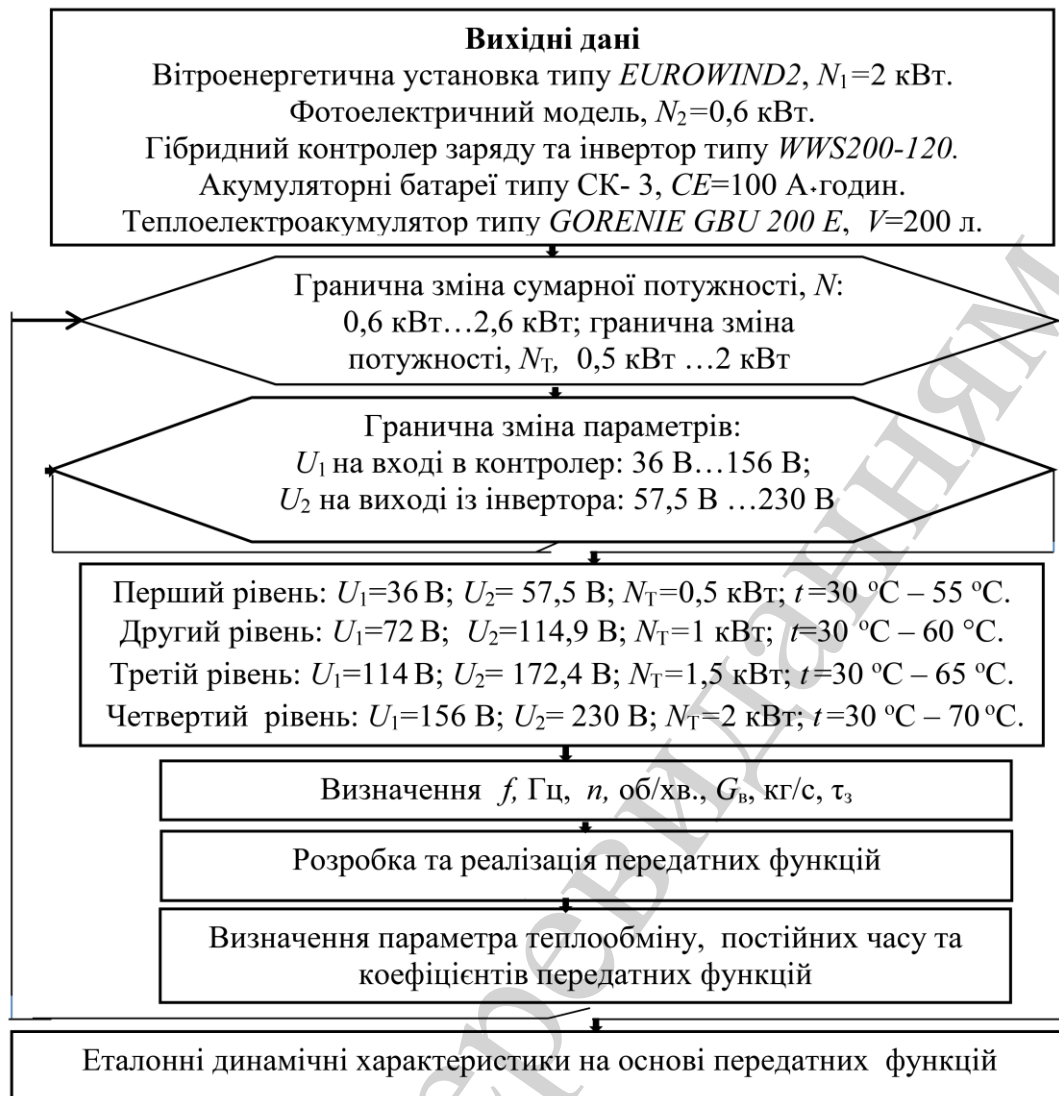


Рис. 2. Структурна схема комплексного математичного моделювання вітро-сонячної електричної системи: N , N_1 , N_2 , N_T – сумарна потужність вітро-сонячної електричної системи, потужність вітроенергетичної установки, фотоелектричного модуля, теплелектроакумулятора, відповідно, кВт; CE – ємність акумуляторної батареї, А·годин; V – об’єм теплелектроакумулятора, л; U_1 , U_2 – напруга на вході в гібридний контролер заряду та на виході із інвертора, відповідно, В; t – температура місцевої води, °С; f – частота напруги, Гц; n – число обертів електродвигуна циркуляційного насоса, об/хв.; G_v – витрата місцевої води, кг/с

Згідно запропонованій структурній схемі (рис. 2) в табл. 1, 2 представлені результати комплексного математичного моделювання вітро-сонячної електричної системи.

Таблиця 1

Режимні параметри вітро-сонячної електричної системи

Рівні функціонування	N , кВт	N_T , кВт	t , °C	G_B , кг/с	τ_z , го-дин	U_1 , В	U_2 , В	f , Гц	n , об/хв.
Перший рівень	0,6	0,5	55	0,0024	3,87	36	57,5	12,5	712,5
Другий рівень	1,2	1	60	0,0043	0,21	72	114,9	25	1425
Третій рівень	1,9	1,5	65	0,0060	0,17	114	172,4	37,5	2137,5
Четвертий рівень	2,6	2	70	0,0073	0,098	156	230	50	2850

Примітка: N , N_T – сумарна потужність вітро-сонячної електричної системи, теплоелектроакумулятора, відповідно, кВт; t – температура місцевої води на виході із теплоелектроакумулятора, °C; τ_z – термін заряду теплоелектроакумулятора; G_B – витрата місцевої води, кг/с; U_1 – напруга на вході в гібридний контролер заряду, В; U_2 – напруга на виході із інвертора, В; f – частота напруги, Гц; n – число обертів електродвигуна циркуляційного насоса, об/хв.

Таблиця 2

Значення параметра теплообміну, постійних часу та коефіцієнтів математичних моделей динаміки

Рівні функціонування	α_B , Вт/(м²·К)	T_B , с	T_M , с	L_B , м	L_B^*	ε^*	ζ
Перший рівень	507,2	97,85	6,65	0,1316	0,8837	0,1116	3,32
Другий рівень	564,7	87,54	5,97	0,2117	0,8253	0,1677	2,08
Третій рівень	595	82,53	5,67	0,2804	0,7810	0,2102	1,57
Четвертий рівень	636,8	78,82	5,29	0,3187	0,7583	0,2320	1,38

Примітка: α_B – коефіцієнт конвективного теплообміну від електронагрівача до місцевої води, Вт/(м²·К)

5. 2. Функціональна оцінка зміни ємності акумуляторної батареї, числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрати місцевої води, що нагрівається

На основі запропонованого математичного обґрунтування підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи (1–5) розроблено структурну схему (рис. 3) щодо контролю працездатності вітро-сонячної електричної системи.

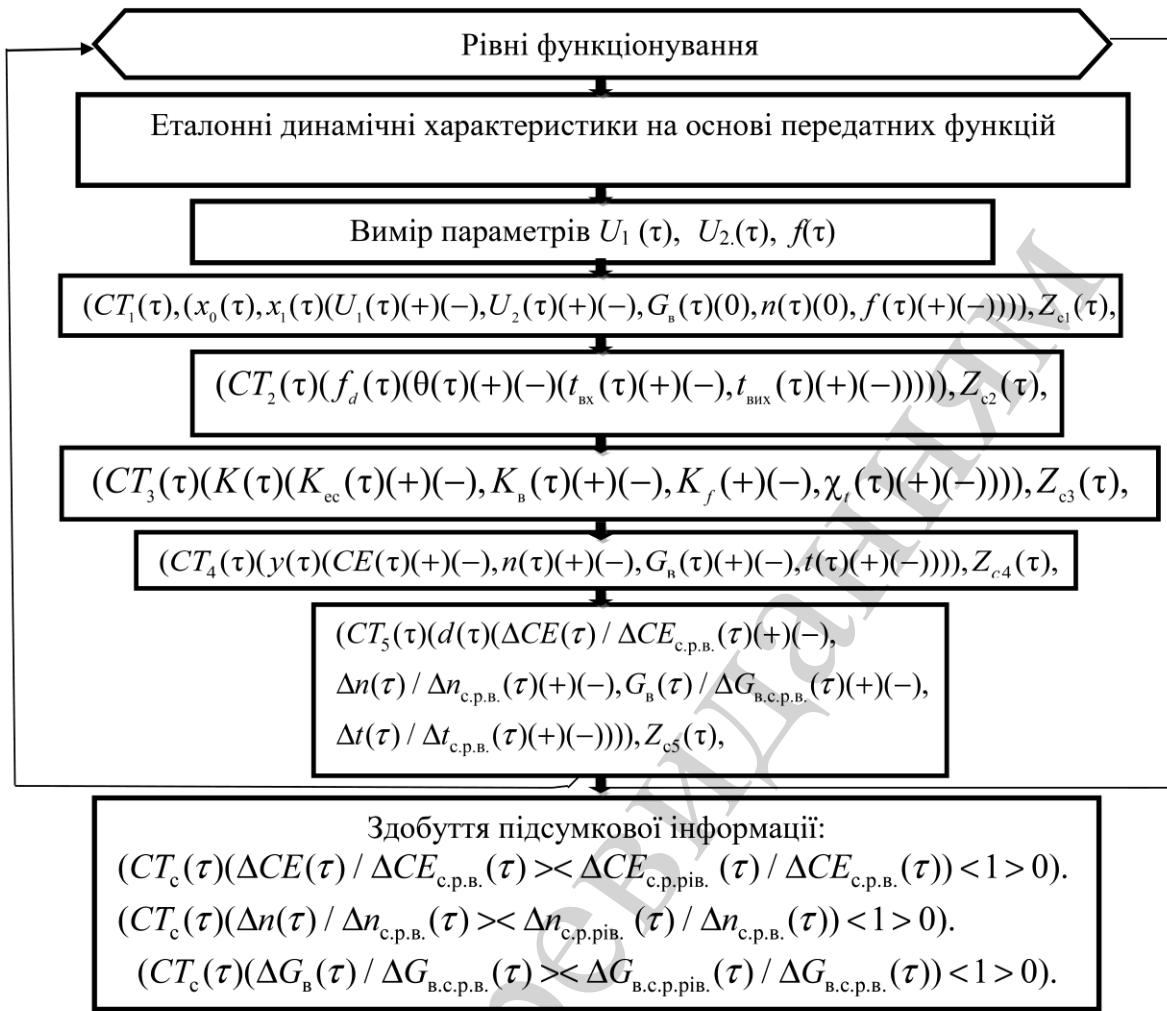


Рис. 3. Структурна схема контролю працездатності вітро-сонячної електричної системи: U_1 , U_2 – напруга на вході в гібридний контролер заряду та на виході із інвертора, відповідно, В; f – частота напруги, Гц; n – число обертів електродвигуна циркуляційного насоса, об/хв.; G_B – витрата місцевої води, кг/с; $t_{\text{вих.}}$, θ – температура місцевої води на виході із теплоелектроаккумулятора, розподіляючої стінки, відповідно, К; CE – ємність акумуляторної батареї, А·годин; CT – контроль події; Z – логічні відносини; d – динамічні параметри; x – впливи; f_d – параметри, що діагностуються; y – вихідні параметри; K – коефіцієнти математичного опису; t – час. Індекси: c – контроль працездатності; с. р. в. – стає, розрахункове значення параметра верхнього рівня функціонування; 0, 1, 2 – початковий стаціонарний режим, зовнішні, внутрішні параметри; 3 – коефіцієнти рівнянь динаміки; 4 – суттєві параметри, що діагностуються; 5 – динамічні параметри

5. 3. Інтегрована система підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи на рівні прийняття рішень

На основі запропонованого математичного обґрунтування (1–5) розроблено структурну схему (рис. 4) підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи на основі підтримки ємності акумуляторної батареї.

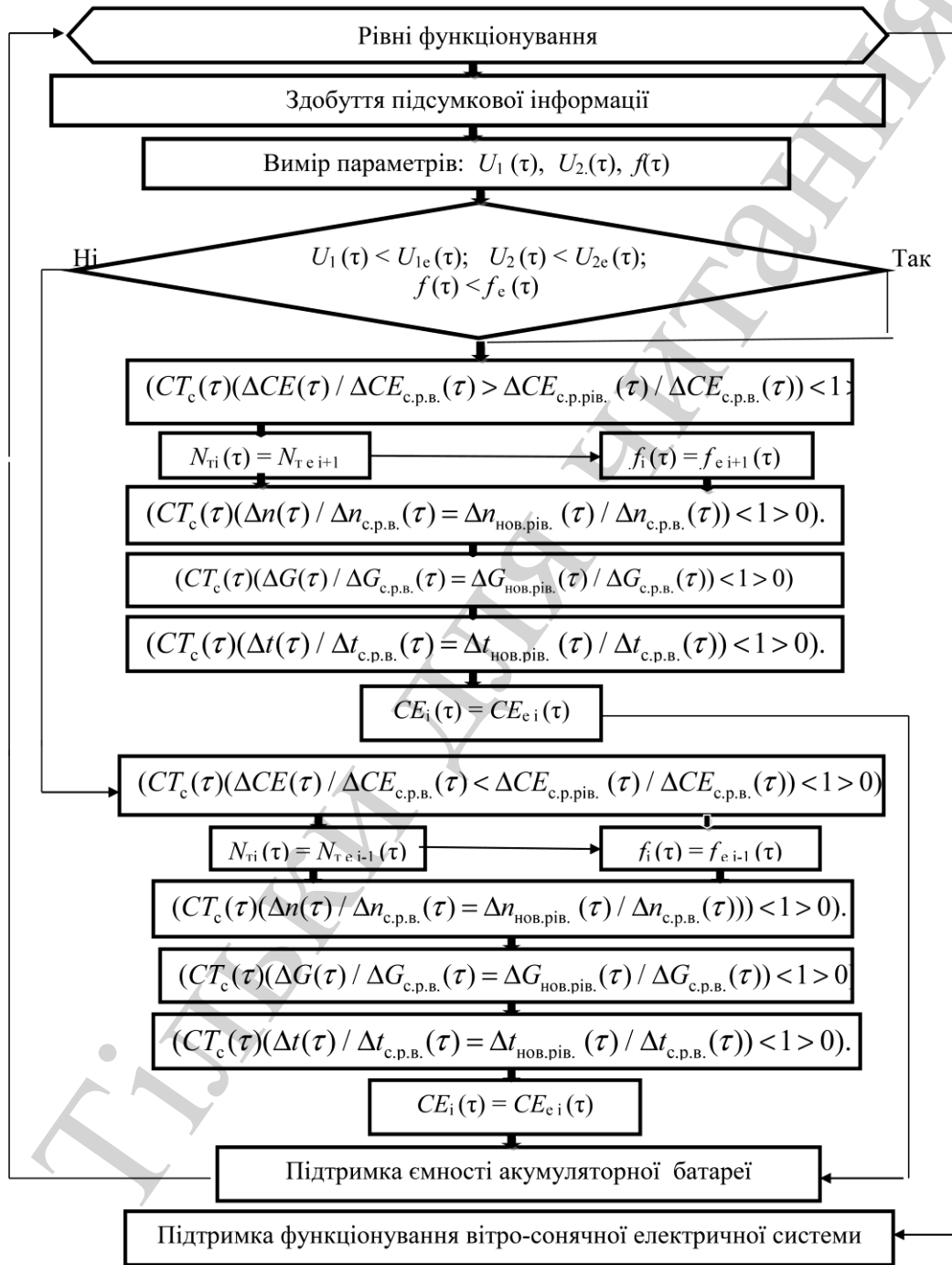


Рис. 4. Структурна схема підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи: U_1, U_2 – напруга на вході в гібридний контролер заряду та на виході із ін-

вертора, відповідно, В; f – частота напруги, Гц; CE – ємність акумуляторної батареї, А·годин; N_T – потужність теплоелектроакумулятора, кВт; n – число обертів електродвигуна циркуляційного насоса, об/хв.; G_B – витрата місцевої води, кг/с; t – температура місцевої води, К; τ – час, Індеси: i – число рівнів функціонування; e – еталонне значення параметра с. р. в. – стале, розрахункове значення параметра верхнього рівня функціонування; нов. рів. – новий рівень функціонування

Розроблено комплексну інтегровану систему підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи (табл. 3), що базується на прогнозуванні зміни ємності акумуляторної батареї при безперервному вимірюванні напруги на вході в гібридний контролер заряду, напруги на виході із інвертора та частоти напруги.

Прийняття упереджених рішень на зміну потужності теплоелектроакумулятора дозволяє, підтримуючи ємність акумуляторної батареї, забезпечити зміну температури місцевої води на основі зміни числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса щодо зміни витрати води.

Таблиця 3

Інтегрована система підтримки ємності акумуляторної батареї

Час, τ , 10^3 с	Зміна параметрів	$\Delta CE(\tau)/\Delta CE_{с.р.в.}(\tau)$	$\Delta n(\tau)/\Delta n_{с.р.в.}(\tau)$	$\Delta G_B(\tau)/\Delta G_{вс.р.в.}(\tau)$	$CE(\tau)$, А·годин	$n(\tau)$, об/хв.	$G_B(\tau)$, кг/с
0	Заряд $U_1=12$ В; $U_2=57,5$ В; $f=2,5$ Гц; $t_1=30$ °С; $t_2=55$ °С	0,0473	0,0327	0,3252	4,73	712,5	0,0024
3	Заряд $U_1=18$ В; $U_2=57,5$ В; $f=2,5$ Гц; $t_1=30$ °С; $t_2=55$ °С	0,0817	0,0654	0,3614	8,17	782,4	0,0027
6	Заряд $U_1=24$ В; $U_2=57,5$ В; $f=7,5$ Гц; $t_1=30$ °С; $t_2=55$ °С	0,1285	0,0982	0,4068	12,85	852,5	0,0030
9	Заряд $U_1=30$ В; $U_2=57,5$ В; $f=10$ Гц; $t_1=30$ °С; $t_2=55$ °С	0,1946	0,1309	0,4646	19,46	922,4	0,0034

12	Заряд $U_1=36$ В; $U_2=57,5$ В; $f=12,5$ Гц; $t_1=30$ °С; $t_2=55$ °С	0,2987	0,1636	0,5420	29,87	992,3	0,0040
15	Прийняття рішення на розряд $U_1=42$ В; $U_2=57,5$ В; $f=12,5$ Гц; $t_1=30$ °С; $t_2=55$ °С	0,4865	0,1998	0,6505	48,65	1069,7	0,0045
18	Розряд $f=20$ Гц $U_1=42$ В; $U_2=92$ В; $t_1=30$ °С; $t_2=60$ °С	0,3198	0,3196	0,7	31,98	1325,8	0,0047
21	Заряд $U_1=54$ В; $U_2=114,9$ В; $f=25$ Гц; $t_1=30$ °С; $t_2=60$ °С	0,3321	0,3996	0,7447	33,21	1496,8	0,0049
24	Заряд $U_1=72$ В; $U_2=114,9$ В; $f=25$ Гц; $t_1=30$ °С; $t_2=60$ °С	0,6285	0,4351	0,8183	62,85	1496,8	0,0053
27	Прийняття рішення на розряд $U_1=78$ В; $U_2=114,9$ В; $f=25$ Гц; $t_1=30$ °С; $t_2=60$ °С	0,7914	0,4351	0,8410	79,14	1496,8	0,0054
30	Розряд $f=30$ Гц $U_1=78$ В; $U_2=137,9$ В; $t_1=30$ °С; $t_2=65$ °С	0,5785	0,5222	0,8651	57,85	1758,4	0,0055
33	Заряд $U_1=114$ В; $U_2=172,4$ В; $f=37,5$ Гц;	0,8676	0,6526	0,8894	86,76	2037,1	0,0056

	$t_1=30\text{ }^{\circ}\text{C};$ $t_2=65\text{ }^{\circ}\text{C}$						
36	Прийняття рішення на розряд $U_1=120\text{ В};$ $U_2=172,4\text{ В};$ $f=37,5\text{ Гц};$ $t_1=30\text{ }^{\circ}\text{C};$ $t_2=65\text{ }^{\circ}\text{C}$	1	0,7548	0,9096	100	2255,5	0,0057
39	Розряд $f=40\text{ Гц};$ $U_1=120\text{ В};$ $U_2=183,9\text{ В};$ $t_1=30\text{ }^{\circ}\text{C};$ $t_2=70\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,8856	0,8053	0,93	88,56	2363,4	0,0058
42	Заряд $U_1=150\text{ В};$ $U_2=230\text{ В};$ $f=50\text{ Гц};$ $t_1=30\text{ }^{\circ}\text{C};$ $t_2=70\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,8894	1	0,9530	88,94	2780,6	0,0059
45	Заряд $U_1=156\text{ В};$ $U_2=230\text{ В};$ $f=50\text{ Гц};$ $t_1=30\text{ }^{\circ}\text{C};$ $t_2=70\text{ }^{\circ}\text{C}$	1	1	1	100	2850	0,0073

Примітка: U_1 , U_2 – напруга на вході в гібридний контролер заряду та на виході із інвертора, відповідно, В; f – частота напруги, Гц; t_1 , t_2 – температура місцевої води на вході в теплоелектроаккумулятор та на виході із теплоелектроаккумулятора, відповідно, $^{\circ}\text{C}$; CE – ємність акумуляторної батареї, А·годин; n – число обертів електродвигуна циркуляційного насоса, об/хв.; G_v – витрата місцевої води, кг/с; τ – час, с. Індекс: с. р. в. – стале, розрахункове значення параметра верхнього рівня функціонування

Ємність акумуляторної батареї у встановлений термін часу визначено так:

$$CE_i(\tau) = CE_i(\Delta CE_i(\tau) / \Delta CE_{\text{с.р.в.}}(\tau)), \quad (25)$$

де CE – ємність акумуляторної батареї, А·годин. τ – час, с. Індекс: с. р. в. – стале, розрахункове значення параметра верхнього рівня функціонування; i – число рівнів функціонування вітро-сонячної електричної системи.

Число обертів електродвигуна циркуляційного насоса у встановлений термін часу визначено так:

$$n_{i+1}(\tau) = n_i + ((\Delta n_{i+1}(\tau) / \Delta n_{\text{с.р.в.}}(\tau) - \Delta n_i(\tau) / \Delta n_{\text{с.р.в.}}(\tau))(n_2 - n_1)), \quad (26)$$

де n – число обертів електродвигуна циркуляційного насоса, об/хв.; n_1, n_2 – початкове та кінцеве числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, об/хв., відповідно; i – число рівнів функціонування вітро-сонячної електричної системи; τ – час, с. Індекс: с. р. в. – стале, розрахункове значення параметра верхнього рівня функціонування.

Витрату місцевої води у встановлений термін часу визначено так:

$$G_{\epsilon i+1}(\tau) = G_{\epsilon i} + ((\Delta G_{\epsilon i+1}(\tau) / \Delta G_{\text{в с.р.в.}}(\tau) - \Delta G_{\epsilon i}(\tau) / \Delta G_{\text{в с.р.в.}}(\tau))(G_{\epsilon 2} - G_{\epsilon 1})), \quad (27)$$

де $G_{\text{в}}$ – витрата місцевої води, кг/с; $G_{\text{в}1}, G_{\text{в}2}$ – початкове та кінцеве значення витрати місцевої води, кг/с, відповідно (табл. 5); i – число рівнів функціонування вітро-сонячної електричної системи; τ – час, с. Індекс: с. р. в. – стале, розрахункове значення параметра верхнього рівня функціонування; i – число рівнів функціонування вітро-сонячної електричної системи.

Так, наприклад, в термін часу в термін часу $15 \cdot 10^3$ с (4,17 годин) абсолютні значення ємності акумуляторної батареї, числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрати місцевої води з використанням формул (25)–(27) складають:

$$48,65 \text{ А} \cdot \text{годин} = (0,4865) 100 \text{ А} \cdot \text{годин}$$

$$1069,7 \text{ об/хв.} = 992,3 \text{ об/хв.} + (0,1998 - 0,1636)(2850 \text{ об/хв.} - 712,5 \text{ об/хв.}).$$

$$0,0045 \text{ кг/с} = 0,0040 \text{ кг/с} + (0,6505 - 0,5420)(0,0073 \text{ кг/с} - 0,0024 \text{ кг/с}).$$

Графічна залежність зміни ємності акумуляторної батареї щодо прийняття рішень на зміну потужності теплоелектроакумулятора представлена на рис. 5.

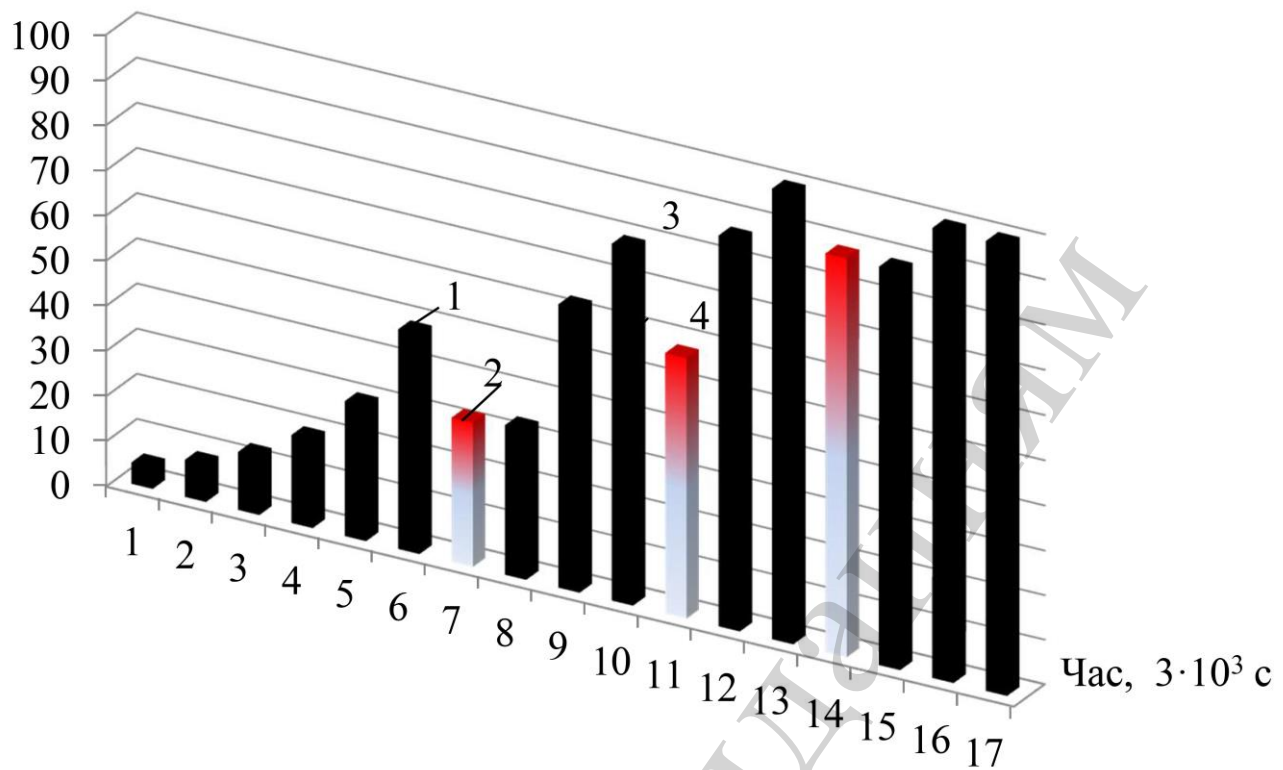


Рис. 5. Підтримка функціонування вітро-сонячної електричної системи, де 1, 3, 5 – прийняття рішення на зміну потужності теплоелектроакумулятора, 2, 4, 6 – розряд щодо підтримки зміни ємності акумуляторної батареї

Так, наприклад, в термін часу $15 \cdot 10^3$ с (4,17 годин) при зміні напруги на вході в гібридний контролер заряду до рівня 42В, прогножуючи збільшення ємності акумуляторної батареї до 20 % необхідно прийняти випереджуюче рішення на збільшення потужності теплоелектроакумулятора на основі зміни частоти напруги з 12,5 ГЦ до 20 ГЦ, Збільшення числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса до рівня 1328 об/хв., дозволяє збільшити витрату місцевої води до рівня 0,0047 кг/с та забезпечити збільшення температури місцевої води до 60 °С. Виконання таких дій дозволить підтримати зміну 20 % ємності акумуляторної батареї до щодо підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи.

6. Обговорення результатів дослідження щодо енергозберігаючої технології підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи

Отримано інтегровану систему підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи на основі узгодження виробництва та споживання енергії в умовах енергозбереження. Зазвичай гібридний контролер заряду у складі вітро-сонячної електричної системи підтримує заряд акумуляторної батареї, використовуючи теплоелектроакумулятор у якості не регульованого баласту. Скидання зайвої енергії на баласт при використанні MPPT функції контролера приводить до не

компенсованих втрат електричної енергії, що не дозволяє забезпечити відповідний рівень потужності заряду акумуляторної батареї. Більш того, використання теплоелектроакумулятора у якості баласта виключає потребу підтримки функціонування вітроенергетичної установки саме з використанням акумуляування теплоти щодо регулювання потужності вітрогенератора. Не врахування цієї якості теплоелектроакумулятора може привести до розгону вітрогенератора при значній швидкості вітру та виходу його із строю. Відомо, що управління теплоелектроакумулятором виконують за принципом термостата, тобто при встановленні необхідної температури місцевої води, що нагрівається, відбувається відключення теплоелектроакумулятора від живлення. Не використання зміни витрати місцевої води впродовж терміну заряду теплоелектроакумулятора при зміні потужності підвищує термін заряду та приводить до значних витрат на споживання електричної енергії. Представлено спосіб подолання цих труднощів. Саме теплоелектроакумулятор має стати головним центром узгодження зміни сумарної потужності вітро-сонячної електричної системи та споживання енергії, виконуючи перерозподіл акумуляованої теплової та електричної енергії щодо споживання. Запропоновано прогнозування зміни ємності акумуляторної батареї при вимірюванні сумарної напруги на вході в гібридний контролер заряду та напруги на виході із інвертора щодо оцінки співвідношення виробництва електричної енергії та споживання при вимірюванні частоти напруги. Саме це співвідношення входить до складу коефіцієнта K_{ce} передатної функції щодо прогнозування зміни ємності акумуляторної батареї та стає об'єднуючим елементом комплексного математичного та логічного моделювання у складі технологічної системи щодо підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи.

Прийняття випереджуючих рішень на зміну потужності теплоелектроакумулятора дозволяє, підтримуючи ємність акумуляторної батареї, забезпечити зміну температури місцевої води, що нагрівається, на основі зміни числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса щодо зміни витрати води, зменшивши термін заряду до 30 %. Представлені результати дослідження є продовженням роботи в напрямку узгодження виробництва та споживання енергії [1, 12–14]. Здобуті результати можуть бути використані в розробці інтелектуальних систем функціонування гібридних контролерів заряду в умовах підтримки функціонування вітро-сонячних електричних систем. Представлення теплоелектроакумулятора як головного центру у перерозподілі акумуляованої енергії надає можливість використати здобуту електричну енергію в повній мірі щодо узгодження із споживанням.

При підключенні до мережі щодо виробництва електричної енергії зменшення терміну заряду теплоелектроакумулятора до 30 % дозволяє здобути грошову економію на споживання електричної енергії та збільшити грошовий прибуток за “зеленим тарифом”. Але економне споживання електричної енергії може бути обмежено встановленим співвідношенням виробництва та споживання електричної енергії. В цьому випадку необхідно приєднання до SMART GRID технологій в умовах узгодження виробництва електричної енергії та економного споживання.

Розвиток даного дослідження полягає в запланованій апробації результатів дослідження в умовах використання вітро-сонячних електричних систем різної потужності. Заплановано розширення функціонування вітро-сонячної електричної системи при підключенні до мережі щодо можливості використання теплоелектроакумулятора у теплонасосному енергопостачанні [14] в складі запропонованої технологічної системи.

7. Висновки

1. Запропоновано прогнозування зміни ємності акумуляторної батареї на основі оцінки зміни співвідношення сумарної напруги на вході в гібридний контролер заряду, напруги на виході із інвертора, що вимірюються, при вимірюванні частоти напруги.

2. Прийняття випереджуючих рішень на зміну потужності теплоелектроакумулятора забезпечує підтримку ємності акумуляторної батареї на основі зміни числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса. Зміна витрати місцевої води, що нагрівається, дозволяє зменшити термін заряду до 30 %.

3. Розроблено структурну схему та виконано комплексне математичне моделювання вітро-сонячної електричної системи, що базується на математичному моделюванні динаміки щодо оцінки зміни ємності акумуляторної батареї, числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрати місцевої води. Об'єднуючим елементом математичного моделювання є оцінка співвідношення напруги на вході в гібридний контролер заряду та напруги на виході із інвертора, що вимірюються. Встановлено граничну зміну потужності теплоелектроакумулятора: 0,5 кВт...2 кВт. Визначено режимні параметри вітро-сонячної електричної системи, параметр теплообміну в теплоелектроакумуляторі, термін заряду теплоелектроакумулятора при зміні витрати води, постійні часу та коефіцієнти математичних моделей динаміки для встановлених рівнів функціонування. Здобуто еталонні динамічні оцінки зміни ємності акумуляторної батареї, числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрати місцевої води. Розроблено структурну схему та виконано логічне моделювання контролю працездатності вітро-сонячної електричної системи, що відбувається за принципом причинно-наслідкових зв'язків. Логічний блок має складові, що оцінюють: зміну напруги на вході в гібридний контролер заряду, напругу на виході із інвертора, частоту напруги, що вимірюються; зміну температури стінки нагрівача; зміну коефіцієнтів математичних моделей динаміки, K_{ce} , K_f , κ_t ; зміну числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрати місцевої води, температури місцевої води; зміну динамічних параметрів; результуючий блок контролю працездатності щодо здобуття функціональної оцінки зміни ємності акумуляторної батареї, числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса, витрати місцевої води.

4. Запропоновано інтегровану систему підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи на основі розробленої структурної схеми логічного моделювання. Підтримка ємності акумуляторної батареї базується на порівнянні

напруги на вході в гібридний контролер заряду, напруги на виході із інвертора, частоти напруги, що вимірюються, з еталонними значеннями. Використання функціональної оцінки зміни ємності акумуляторної батареї, що прогнозується, надає можливість приймати випереджуючі рішення на зміну потужності теплоелектроакумулятора на основі зміни числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса щодо зміни витрати місцевої води, що нагрівається.

Література

1. Chaikovskaya, E. (2017). Development of energy-saving technology to support functioning of the lead-acid batteries. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (8 (88)), 56–64. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108578>
2. Al-Dhaifallah, M., Nassef, A. M., Rezk, H., Nisar, K. S. (2018). Optimal parameter design of fractional order control based INC-MPPT for PV system. *Solar Energy*, 159, 650–664. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.040>
3. Shahriari, M., Blumsack, S. (2018). The capacity value of optimal wind and solar portfolios. *Energy*, 148, 992–1005. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.121>
4. Fathabadi, H. (2017). Novel standalone hybrid solar/wind/fuel cell power generation system for remote areas. *Solar Energy*, 146, 30–43. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.071>
5. Chandra, M., Naiki, S., Anush, D. (2017). Design of solar PV-Wind Hybrid Power generation system. *International Journal of Recent Trends in Engineering and Research*, 3 (10), 89–93.
6. Cao, Z., O'Rourke, F., Lyons, W. (2017). Performance modelling of a small-scale wind and solar energy hybrid system. 2017 28th Irish Signals and Systems Conference (ISSC). doi: <https://doi.org/10.1109/issc.2017.7983616>
7. Vasant, L. G., Pawar, V. R. (2017). Solar-wind hybrid energy system using MPPT. 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS). doi: <https://doi.org/10.1109/iccons.2017.8250531>
8. Derrouazin, A., Aillerie, M., Mekkakia-Maaza, N., Charles, J.-P. (2017). Multi input-output fuzzy logic smart controller for a residential hybrid solar-wind-storage energy system. *Energy Conversion and Management*, 148, 238–250. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.046>
9. Jia, Y., Liu, X. J. (2014). Distributed model predictive control of wind and solar generation system. *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*. doi: <https://doi.org/10.1109/chicc.2014.6896301>
10. Saidi, A., Chellali, B. (2017). Simulation and control of Solar Wind hybrid renewable power system. 2017 6th International Conference on Systems and Control (ICSC). doi: <https://doi.org/10.1109/icosc.2017.7958647>
11. Maleki, A., Hafeznia, H., Rosen, M. A., Pourfayaz, F. (2017). Optimization of a grid-connected hybrid solar-wind-hydrogen CHP system for residential applications by efficient metaheuristic approaches. *Applied Thermal Engineering*, 123, 1263–1277. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.100>

12. Чайковская, Е. Е. (2016). Согласование производства и потребления энергии на основе интеллектуального управления тепломассобменными процессами. XV Минский международный форум по тепломассобмену: материалы XV Минск. межд. форума по тепломассобмену. Секция 8. Тепломассоперенос в энергетических процессах и оборудовании. Энергосбережение. Минск, 1–12.

13. Чайковська, Є. Є. (2016). Інформаційні технології підтримки функціонування енергетичних систем на рівні прийняття рішень. Інформатика. Культура. Техніка: зб. тез доп. IV укр.-нім. конф. Одеса, 32–33.

14. Chaikovskaya, E. (2018). Development of energy-saving technology for maintaining the functioning of heat pump power supply. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (8 (94)), 13–24. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139473>